

Теоретичні основи розробки систем озброєння

УДК 621.396.06

Н.С. Антоненко, Е.А. Прокопенко

Українська інженерно-педагогічна академія, Харків

МЕТОД ЗАЩИТЫ БОРТОВЫХ РАДИОТЕХНИЧЕСКИХ И ТЕЛЕКОММУНИКАЦИОННЫХ СИСТЕМ ОТ МОЩНЫХ ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫХ ИЗЛУЧЕНИЙ

В работе определен подход к разработке метода защиты бортовых радиотехнических и телекоммуникационных систем от мощных электромагнитных излучений. Использование предлагаемого метода позволяет сократить время переключательных процессов и уменьшить энергозатраты. Применение метода при проектировании и модернизации существующих трактов бортовых радиотехнических и телекоммуникационных систем позволит повысить степень защиты их приемных трактов в СВЧ диапазоне от влияния мощных электромагнитных излучений.

Ключевые слова: радиотехнические и телекоммуникационные системы, средства защиты, мощное электромагнитное излучение, источники ионизации радиоизотопного типа.

Введение

Общая постановка проблемы. В настоящее время вопросам генерирования мощных излучений (1 ГВт и более) уделяется серьезное внимание в таких странах как США, Япония, Германия и т.д. Применение генераторов мощных электромагнитных излучений (ЭММИ) позволяет обеспечить передачу информации на большие расстояния и может быть использовано в различных отраслях народного хозяйства, в частности в космической отрасли, в целях навигации и т.д. Однако при попадании в зону действия таких генерирующих систем других радиоэлектронных средств (РЭС), используемых, например, для приема информации спутниковыми системами, может произойти не только нарушение процесса приема информации, но и нарушение функциональной целостности приемных трактов радиотехнических и телекоммуникационных систем (РТиТС), используемых в первую очередь на летательных аппаратах (ЛА) различного назначения.

Анализ исследований и публикаций. Для повышения степени защищенности приемных трактов РТиТС используются различные методы и устройства, однако, как показал анализ [1 – 3], в настоящее время отсутствуют эффективные защитные устройства приемных трактов, способные противостоять мощным электромагнитным излучениям, в частности, в СВЧ диапазоне.

Известные методы защиты приемных трактов, реализуемые в их входных цепях, а также устрой-

ства защиты, к которым относятся газоразрядные [4, 5], полупроводниковые [6, 7] и вакуумные [8, 9], а также устройства защиты на основе высокотемпературных сверхпроводников [10], не могут быть использованы во входных цепях СВЧ приемных устройств РТиТС в виду больших габаритов, необходимости применения дополнительных источников питания, искажения рабочих сигналов РТиТС из-за внесения неоднородности в тракт прохождения сигналов и невозможности регулировки уровня пороговой мощности помех. В связи с этим сложившееся противоречие между известными устройствами защиты входных цепей приемных трактов и возможностью их практического использования в бортовых РТиТС СВЧ диапазона, прежде всего, в сантиметрового и миллиметрового диапазона длин волн, является серьезной проблемой в области создания эффективных РТиТС, способных выполнять свои функции в жестких условиях воздействия мощных электромагнитных излучений.

Анализ последних достижений в области защиты приемных трактов РТиТС от мощных электромагнитных излучений показал, что эта сложная техническая задача может быть решена на основе применения защитных устройств, используемых во входных цепях приемных трактов бортовых РТиТС.

Так, для защиты от мощных электромагнитных излучений без внесения конструктивных изменений в тракты радиотехнических и телекоммуникационных систем и не приводящих к трансфор-

мації и искажениям полезного сигнала целесообразно использовать подход, основанный на создании предварительной ионизации во входных цепях приемного тракта с последующим изменением концентрации заряженных частиц под воздействием пришедшего на вход электромагнитного излучения и приводящему к его не прохождению в последующие каскады приемника. Повышение степени защищенности бортовых (БРТиТС) от мощных электромагнитных излучений может быть обеспечена на основе создания предварительной ионизации воздушной среды во входных цепях приемных трактов с помощью источников радиоизотопного типа.

Задача эффективной защиты приемных трактов бортовых РТиТС на основе применения источников ионизации радиоизотопного типа в настоящее время представляется весьма важной и актуальной и требует новых подходов к разработке и совершенствованию существующих методов защиты приемных трактов СВЧ диапазона.

Целью настоящей работы является разработка метода защиты входных цепей приемного тракта, основанного на создании в волноводе неоднородности с изменяющейся проводимостью, причем неоднородность создается непрерывно с помощью радиоизотопного источника, а в области неоднородности создается поперечное постоянное магнитное поле.

Результаты исследований

Как известно [12], внутри волновода за счет электрического поля электромагнитной волны, проходящей по волноводу, будет создаваться некоторая ионизация газа, находящегося внутри волновода с плотностью электронов, соответствующей распределению электрического поля внутри волновода (рис. 1).

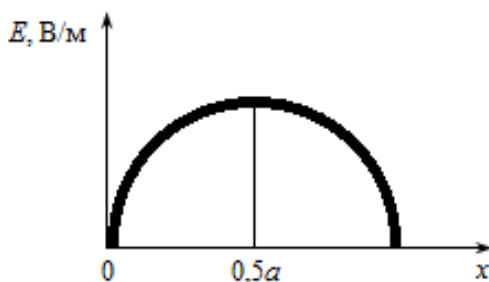


Рис. 1. Распределение электрического поля внутри волновода

Однако проводимость участка ионизации (плазмы) очень мала даже при прохождении мощной СВЧ электромагнитной волны ($n_{e0} \sim 10^4 \text{ см}^{-3}$), что не приводит к замыканию электромагнитной волны на любом участке ионизованного газа. Ра-

диоактивный источник приводит к созданию внутри волновода вспомогательной низкотемпературной слабоионизованной плазмы. Так как напряженность электрического поля (рис. 1) имеет максимальное значение в центре волновода, то в этом месте за счет ионизации газа электрическим полем и радиоизотопным источником будет максимальная начальная (вспомогательная) концентрация свободных электронов (подкритическая концентрация). Приходящий информационный сигнал не вызывает резкого увеличения проводимости плазмы, не вызывает замыкания (отражения) этого сигнала через участок ионизации, то есть информационный сигнал проходит по волноводу на входные цепи бортовой РТиТС. При воздействии же мощного СВЧ излучения внутри волновода в области расположения радиоизотопного источника будет создаваться плазма с высокой проводимостью (концентрация электронов становится выше критической), замыкая это электромагнитное излучение и не пропуская его во входные цепи приемного тракта РЭС, то есть защищая радиоэлектронную аппаратуру от воздействия мощных СВЧ излучений. После прекращения воздействия мощного СВЧ излучения проводимость плазмы резко уменьшается, и РЭС продолжает работать в нормальном режиме. Таким образом, чувствительность устройства для защиты входных цепей приемного тракта (порог срабатывания) будет зависеть от места расположения в волноводе радиоизотопного источника.

Перемещая радиоизотопный источник, то есть, увеличивая или уменьшая интенсивность воздействия источника на газ внутри волновода (увеличивая или уменьшая концентрацию электронов внутри волновода), можно регулировать уровень защищаемой мощности. Для уменьшения времени срабатывания газового разряда (уменьшения коэффициента диффузии электронов) в области нахождения радиоизотопного источника необходимо создавать постоянное магнитное поле с помощью соленоида.

При исследовании СВЧ пробоя в воздухе [13] электромагнитными импульсами была обнаружена сильная зависимость пробойной величины электрической напряженности СВЧ поля от частоты повторения импульсов. При многократном повторении воздействующих импульсов СВЧ поля пробойное поле снижалось более чем в три раза по сравнению с воздействием одного импульса в области давлений воздуха $p < 10^{-1} \text{ Тор}$. В экспериментах, представленных в работе [13] наблюдалось влияние частоты повторения импульсов на СВЧ пробой при давлении $p > 25 \text{ Тор}$. При этом пробойная напряженность СВЧ поля снижалась не более чем на 8 %.

В работе [14] было показано существование влияния предионизации на пробой. Установлено количественное соответствие расчетных и измеренных зависимостей пробойной напряженности СВЧ поля $E_{\text{п}}$ от давления воздуха $p = 10^{-2} \dots 10^{-1}$ Тор для случаев, отличающихся крайними режимами диффузии электронов при пробое: свободной диффузии и амбиполярной диффузии при наличии предионизации стационарным тлеющим разрядом с $n_{e_0} \sim 10^9 \text{ см}^{-3}$. При этом пробойные поля уменьшались в несколько раз.

Пробой газа, в частности, воздуха в переменном электрическом поле $E_0 \sin \omega t$ (E_0 – амплитуда) можно описать уравнением кинетики электронной концентрации n_e [15].

$$n_e^{-1} \frac{dn_e}{dt} = \nu_i(E_0) - \nu_a - \nu_d \quad (1)$$

и его решением

$$n_e(t) = n_0 \exp\{[\nu_i(E_0) - \nu_a - \nu_d]t\}, \quad (2)$$

где $\nu_i(E_0) = \nu_a \left(\frac{E_0}{E_k}\right)^{5,3}$; $E_k = 37 \left(1 + \frac{\omega^2}{\nu_y^2}\right)$, [В/см] – критическое поле;

$\nu_d = -n_e^{-1} \nabla^2 (Dn_e)$ – частота диффузии, характеризующая скорость потерь электронов из области пробоя.

Согласно (1) для начала пробоя в стационарном СВЧ поле достаточно выполнить условие $\nu_i(E_0) - \nu_a - \nu_d \geq 0$.

В импульсном СВЧ поле условие пробоя оказывается более жестким, так как за время длительности импульса τ_p концентрация электронов должна достигать некоторого условного уровня, например, критического, для заданной частоты поля $n_{\text{cr}} = m_e \omega^2 / 4\pi e^2$ ($n_{\text{cr}} = 1,24 \cdot 10^{10} \text{ ф}^2$) [14].

$$\nu_i(E_0) - \nu_a - \nu_d \geq \tau_p^{-1} \ln \left(\frac{n_{\text{cr}}}{n_{e_0}} \right). \quad (3)$$

Из (3) следует, что при увеличении уровня остаточной ионизации n_{e_0} , связанной с увеличением частоты следования СВЧ импульсов, между которыми плазма не успевает полностью распасться, импульсный пробой требует меньшей частоты ионизации ν_i и соответствующего пробойного поля $E_{\text{п}}$. Однако этот эффект снижения пробойного поля при увеличении частоты следования импульсов безусловно играет свою роль, но им нельзя объяснить снижения амплитуды пробойного поля более чем в 1,5 раза.

Это значит, что существует зависимость от n_{e_0} либо самой частоты ионизации ν_i либо частоты диффузии ν_d .

Частотой прилипания ν_a при давлениях воздуха $p < 10^{-1}$ Тор можно пренебречь. Поэтому наиболее вероятными причинами дополнительного снижения амплитуды пробойного СВЧ поля представляются зависимость от n_{e_0} частоты ионизации ν_i и коэффициента диффузии электронов D и соответствующей частоты $\nu_d = 4D/r_E^2$ (расширение из области пробоя радиуса r_E). Эта зависимость резко проявляется в области концентраций $10^5 \leq n_{e_0} \leq 10^7 \text{ см}^{-3}$, соответствующей переходу диффузии от свободной (одночастичной) к амбиполярной (плазменной) [16].

Однако не следует исключать из рассмотрения и альтернативную возможность снижения пробойного поля с ростом частоты следования импульсов за счет увеличения скорости ионизации ν_i . Рост ν_i может быть вызван, например, снижением среднего потенциала ионизации воздуха из-за накопления в повторяющемся импульсном СВЧ разряде долгоживущих метастабильных атомов или молекул азота и кислорода с высокими уровнями возбуждения [15], а также за счет образования химических соединений компонентов воздуха с пониженным потенциалом ионизации, например, закись азота NO. Как было показано в выражении (2), частота ионизации ν_i зависит от амплитуды E_0 , частоты ω переменного электрического поля и концентрации молекул воздуха N_m . Эта зависимость представлена на рис. 2 в виде функции от E_0/E_k [11].

При $E_0 = E_k$ частота ионизации сравнивается с частотой прилипания ν_a , при $E_0 > E_k$ $\nu_i > \nu_a$ и наступает пробой.

При изменении E_0/E_k от 1,3 до 3 можно использовать эмпирическую формулу [16]

$$\frac{\nu_i}{\nu_a} \approx \left(\frac{E_0}{E_k} \right)^{5,3}, \quad (4)$$

хорошо сочетающуюся с теоретической кривой (рис. 2), где эмпирическая зависимость (4) показана штриховой линией.

При $E_0/E_k > 4$ рост ν_i быстро ослабевает, а при $E_0/E_k < 10^2$ частота ионизации достигает максимума и начинает медленно спадать. Причина падения заключается в уменьшении полного сечения ионизации при высоких энергиях электрона $\varepsilon > 10^2 \dots 10^3 \text{ эВ}$.

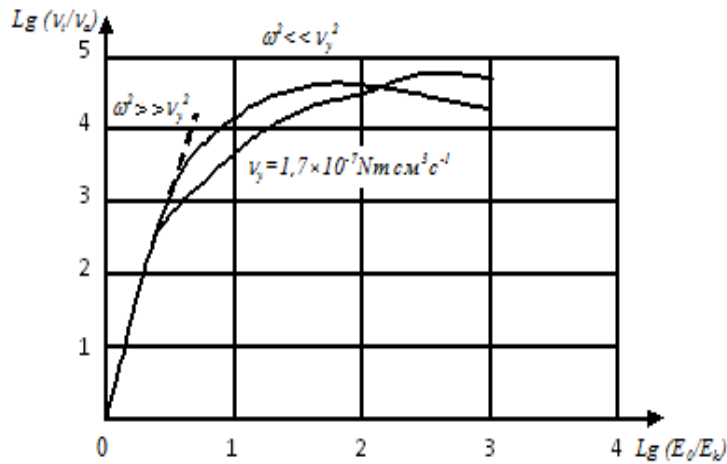


Рис. 2. Частота ионизации v_i в воздухе в зависимости от амплитуды переменного электрического поля E_0

Определим оптимальные условия ионизации, когда при заданной энергии СВЧ импульса число возникающих в газе ионов максимально. В условиях оптимума наибольшая доля энергии СВЧ импульса идет на образование электрон-ионных пар. Учитывая, что плотность энергии импульса W пропорциональна его длительности τ_p и квадрату амплитуды поля E_0^2 , причем длительность τ_p при заданном изменении концентрации ионов обратно частоте ионизации $v_i(E_0)$, находим, что

$$W \sim \frac{E_0^2}{v_i(E_0)}$$

На рис. 3 показана необходимая для ионизации энергия импульса в зависимости от его амплитуды E_0 при $\omega^2 \gg v_y^2$ [11]. Минимальная величина энергии импульса W_m , как видно из рис. 3, достигается при следующем условии [11]:

$$E_0 = E_{0m} \approx (6 \dots 8) E_K \tag{5}$$

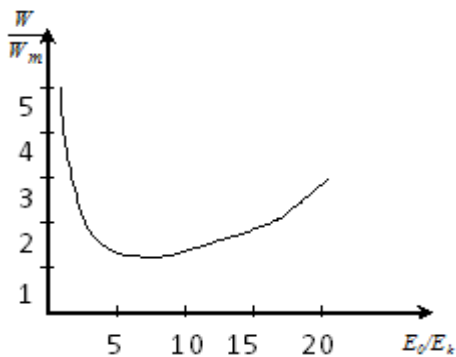


Рис. 3. Энергия импульса для ионизации в зависимости от его амплитуды E_0

Первое значение E_{0m} соответствует низкочастотному ($\omega^2 \ll v_y^2$), второе – высокочастотному

($\omega^2 \gg v_y^2$) пределу. Само значение

$$W_m \sim (\omega^2 + v_y^2) / v_y$$

изменением v_y нарастает и при низких ($\omega^2 < v_y^2$), и при высоких ($\omega^2 > v_y^2$) частотах.

Оно минимально при [11]

$$\omega \approx v_y \tag{6}$$

Выражения (5) и (6) определяют частоту и мощность переменного электрического поля, при которых ионизация в воздухе оптимальна. Эти выражения справедливы при достаточно высоком давлении плазмы, когда диффузия незначительна.

В заключение следует отметить, что если частота повторения СВЧ импульсов будет небольшая, то за время паузы между импульсами за счет рекомбинации, диффузии и прилипания резко упадет проводимость плазмы, а это значит, что пробойное СВЧ поле возрастет и на вход приемного тракта пройдет сигнал мощностью, превышающей пороговый уровень. Это, в свою очередь, приведет к выходу из строя элементов приемника. Поэтому создание вспомогательной (дополнительной) ионизации воздуха во всех случаях будет приводить к снижению пробивной напряженности СВЧ поля, то есть к созданию защиты входных цепей приемного тракта РЭС.

Выводы

Использование предлагаемого метода защиты приемного тракта радиоэлектронных систем приводит к следующим преимуществам по сравнению с известными методами:

1. Время переключательных процессов на два порядка меньше, чем у газоразрядных защитных устройств, и одного порядка со временем переключения полупроводниковых приборов ($< 10^{-8}$ с).

2. Энергозатраты на создание процесса короткого замыкания (неоднородности с изменяющейся проводимостью) значительно меньше энергозатрат, используемых в газоразрядных защитных устройствах и в защитных устройствах на полупроводниковых приборах.

Перспективы дальнейших исследований

Представляет интерес в дальнейшем использовать предложенный метод защиты приемных трактов БРТИТС от мощных ЭМИ в СВЧ диапазоне при проектировании и модернизации существующих БРТИТС, использование которых позволит повысить степень защиты приемных трактов БРТИТС в СВЧ диапазоне от влияния мощных ЭММИ.

Список литературы

1. Ситнов Х.В. Направления модернизации российского вооружения / Х.В. Ситнов // Военный парад. – 2000. – № 5. – С. 5-6.
2. Силкин А.И. Универсальные беспилотники / А.И. Силкин, А.Б. Бренер, А.В. Дробышевский // Независимое военное обозрение. – 2003. – № 4. – С. 4-7.
3. Рудов В.И. Воздушный компонент американской системы ПРО на ТВД / В.И. Рудов // Зарубежное военное обозрение. – 1998. – № 5. – С. 18-61.
4. Резонансные разрядники антенных переключателей / Д.Я. Ашкенази, В.П. Беляев, Г.И. Бродуленко и др.; под ред. И.В. Лебедева. – М.: Советское радио, 1976. – 274 с.
5. Голант В.Е. Газовый разряд на СВЧ / В.Е. Голант // УФН. – 1958. – Т. 65, № 1. – С. 39-69.
6. Лебедев И.В. Квазиактивный защитный ограничитель СВЧ мощности / И.В. Лебедев, М.В. Семенча // Радиотехника. – 2001. – № 2. – С. 17-21.
7. Крутов А.В. Защитное устройство малого уровня мощности / А.В. Крутов, В.А. Митмен, А.С. Ребров //

В кн. 12-я Международная Крымская конференция «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии»: мат-лы конф. – Севастополь, 2002; Вебер, 2002. – С. 93.

8. Электронные приборы СВЧ на быстрой циклотронной волне электронного потока / Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский, С.П. Кантюк и др. // Радиотехника. – 1999. – № 4. – С. 32-36.

9. Комплексированные усилители с циклотронной защитой для приемников РЛС / Ю.А. Будзинский, С.В. Быковский, С.А. Вильдманов и др. // XI Международная Крымская конференция «СВЧ техника и телекоммуникационные технологии». – Севастополь, 2001. – С. 190-191.

10. Авторское свидетельство №325202 (СССР), способ защиты радиоэлектронной аппаратуры / Г.Ф. Коныхин, К.Н. Коныхин, В.Л. Верещагин и др. Заявлено 26.02.09, опубл. 01.04.91.

11. Мецераков С.М. Метод защиты входных цепей приемных трактов бортовых радиоэлектронных систем от воздействия от мощных СВЧ импульсных электромагнитных излучений. – ЕЕJET. 1/2 (13) 2005. – С. 53-61.

12. Гуревич А.В. Ионизованный слой в газе (в атмосфере) / А.В. Гуревич // Успехи физических наук, 1980. – Т. 132, вып. 4. – С. 685-690.

13. Gould L., Roberts L.W. Appl. Phys., 1956. – V. 27. – H.I 162.

14. Карфидов Д.М. О влиянии предионизаций на пробой. / Д.М. Карфидов, Н.А. Лукина, К.Ф. Сергейчев // Физика плазмы. – 1981. – № 7. – С. 312.

15. McDonald. Сверхвысокочастотные пробои в газах. – М.: Мир, 1969. – 231 с.

16. Браун С. Электронные процессы в плазме газового разряда / С. Браун. – М.: Госатомиздат, 1961. – 97 с.

Поступила в редколлегию 7.04.2015

Рецензент: д-р техн. наук, проф. В.И. Барсов, Украинская инженерно-педагогическая академия, Харьков.

МЕТОД ЗАХИСТУ БОРТОВИХ РАДІОТЕХНІЧНИХ І ТЕЛЕКОМУНІКАЦІЙНИХ СИСТЕМ ВІД ПОТУЖНИХ ЕЛЕКТРОМАГНІТНИХ ВИПРОМІНЮВАНЬ

Н.С. Антоненко, О.О. Прокопенко

У роботі визначено підхід до розробки методу захисту бортових радіотехнічних і телекомунікаційних систем від потужних електромагнітних випромінювань. Використання пропонуваного методу дозволяє скоротити час процесів перемикання і зменшити енерговитрати. Застосування методу при проектуванні і модернізації існуючих трактів бортових радіотехнічних і телекомунікаційних систем дозволить підвищити ступінь захисту їх приймальних трактів в НВЧ діапазоні від впливу потужних електромагнітних випромінювань.

Ключові слова: радіотехнічні і телекомунікаційні системи, засоби захисту, потужне електромагнітне випромінювання, джерела іонізації радіоізотопного типу.

THE METHOD OF RECEIVING SECTIONS PROTECTION OF THE ON-BOARD RADIO ENGINEERINGS SYSTEMS FROM INFLUENCE OF POWERFUL E-FIELD RADIATION

N.S. Antonenko, Ye.A. Prokopenko

This article is devoted development of method of receiving sections protection of the on-board radio on-board radio engineerings systems from influence of powerful E-field radiation. The offered method allows to shorten switch processes time and decrease the expenses of energy. Application of method for planning and modernization of existent systems will allow to promote the defence degree of their receiving from influence of powerful electromagnetic radiations.

Keywords: radio technical and television systems, facilities of defense, powerful E-field radiation, sources of ionization of radioisotope type.